



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

DISEÑO DE PRÓTESIS OCULAR ELECTRÓNICA

Julio David Morales Romero

Asesorado por el Phd. Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo

Guatemala, mayo de 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE PRÓTESIS OCULAR ELECTRÓNICA

TRABAJO DE GRADUACIÓN
PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JULIO DAVID MORALES ROMERO

ASESORADO POR EL PHD. ING. ENRIQUE EDMUNDO RUIZ CARBALLO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, MAYO DE 2009

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Ing. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARÍA	Ing. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Enrique Edmundo Ruiz Carballo
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
SECRETARÍA	Ing. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE PRÓTESIS OCULAR ELECTRÓNICA,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, el 31 de marzo de 2008.

Julio David Morales Romero

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por ayudarme a hacer lo mas difícil de la vida, vivir. Y permitirme cumplir mis sueños.
Mis padres	Por enseñarme todo lo que se, ser mi guía, y aun sin estar aquí, lo siguen haciendo.
Mi asesor	Por toda la ayuda y consejo brindado para realizar este trabajo de graduación.
Mis amigos	Maco, Héctor, Pedro, Josué, Andrés, Miguel, Rafa y demás, por las buenas experiencias que pasamos juntos en proyectos, laboratorios, pasillos en todo este tiempo.
La Universidad de San Carlos	Por haberme brindado la oportunidad de ser parte de esta casa de estudios.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
RESUMEN.....	V
OBJETIVOS	VII
INTRODUCCIÓN.....	IX
1. LA LUZ.....	1
1.1. El espectro electromagnético	1
1.1.1. Las ondas de radiofrecuencia	3
1.1.2. Las microondas	4
1.1.3. La radiación infrarroja.....	4
1.1.4. La luz visible.....	4
1.1.5. Radiación ultravioleta	5
1.1.6. Rayos X.....	5
1.1.7. Rayos gamma	5
1.2. El espectro visible.....	6
1.3. Propiedades de la luz	8
1.3.1. La luz se propaga en línea recta	8
1.3.2. La luz se refleja	9
1.3.3. La luz se refracta.....	11
1.4. La luz y la materia	14
2. EL OJO HUMANO	19
2.1. Anatomía del ojo humano.....	20
2.1.1. Globo ocular	20
2.2. Funcionamiento del ojo.....	21
2.2.1. Córnea.....	22
2.2.2. Iris.....	22
2.2.3. Esclerótica.....	22
2.2.4. Coroides	22
2.2.5. Retina	23
2.2.6. Conjuntiva	23
2.2.7. Cristalino	24
2.2.8. Cuerpo vítreo.....	24
2.3. Fotorreceptores, conos y bastones	26
2.3.1. Fotoquímica de la visión.....	30
2.4. Visión binocular	34

2.5.	El nervio óptico.....	35
3.	ANALOGÍA CÁMARA OJO.....	37
3.1.	Cámara fotográfica.....	38
3.1.1.	El anillo de enfoque.....	39
3.1.2.	El diafragma.....	39
3.1.3.	El obturador.....	39
3.2.	Procesamiento digital de imágenes.....	40
3.2.1.	Histograma.....	41
3.2.2.	Modificación de un histograma.....	42
3.2.3.	Ecuilización del histograma.....	44
3.2.4.	Expansión del histograma.....	45
3.2.5.	Umbral.....	46
3.2.6.	Inversión (negativo).....	48
4.	DISEÑO DE PRÓTESIS OCULAR.....	51
4.1.	La biónica.....	52
4.2.	Diseño de un ojo biónico.....	55
4.2.1.	Cómo será la visión.....	56
4.2.2.	Fotorreceptor.....	56
4.2.3.	CPU.....	57
4.2.4.	Enlace biónico.....	58
4.2.5.	Tecnologías similares.....	60
	CONCLUSIONES.....	63
	RECOMENDACIONES.....	65
	BIBLIOGRAFÍA.....	67

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figuras

1 Representación gráfica electromagnético en escala logarítmica	2
2 Representación gráfica del espectro electromagnético en escala	2
3 Espectro visible.....	7
4 Propagación de la luz en línea recta, sombra y penumbra	9
5 Leyes de la reflexión	10
6 Reflexión en espejos cóncavos y convexos.....	11
7 Rayo refractado al pasar por un material.....	12
8 Dispersión de la luz por un Prisma	13
9 Rayos de luz a través de un objeto transparente.....	15
10 Rayos de luz a través de un objeto opaco.	15
11 Rayos de luz a través de un objeto translúcido.....	16
12 Composición de los colores a partir de los 3 primarios.....	16
13 Anatomía del ojo humano.	20
14 Estructura celular de la retina.	27
15 Disco óptico y fóvea.....	29
16 Composición celular de los conos y bastones.	30
17 Visión binocular y monocular.	35
18 Partes de la cámara y partes del ojo.....	37
19 Anillo de enfoque, diafragma y obturador.	40
20 Ejemplo de un histograma.	41
21 Gráfica de un histograma modificado.	43
22 Gráfica de un histograma aclarado y oscurecido.	43
23 Imagen de muestra de ecualización de histograma.....	44

24 Gráfica de ecualización.	44
25 Expansión del histograma.	45
26 Gráfica de la expansión del histograma.....	46
27 Curva tonal.	46
28 Imagen de ejemplo de cambio de umbral.....	47
29 Cambio de umbral a 125 y a 200 respectivamente.	47
30 Curva tonal a un respectivo umbral.	48
31 Curva tonal a 2 niveles de umbral.	48
32 Curva de inversión.....	49
33 Comunicación unidireccional.	54
34 Comunicación bidireccional.	54
35 Comunicación unidireccional, ojo-cerebro.....	54
36 Comunicación bidireccional, con procesamiento de señales.....	55
37 Cámara digital con fotorreceptores.....	57
38 Diagrama de bloques.	59
39 Diagrama de bloques más imagen.	59

Tablas

I Bandas de color en el espectro visible.....	7
---	---

RESUMEN

Antes de poder definir el funcionamiento de ojo humano y poder discutir la implementación de un posible sustituto del mismo, es necesario saber que el ojo humano es un receptor de luz, por lo tanto estudiaremos a lo largo de este trabajo el fenómeno llamado luz, y los conceptos generales que lo conforman.

También se observará que es necesario estudiar el fenómeno de la luz como tal para poder entender el funcionamiento del ojo humano; en los siguientes capítulo se estudiará el funcionamiento del ojo humano para poder definir sí es posible utilizar un sustituto electrónico del mismo.

El ojo muy probablemente es uno de los órganos mas complejos que el cuerpo humano posee, se observará que prácticamente el ojo es un transductor, ya que se encarga de convertir energía electromagnética radiada a diferentes longitudes de onda, en pulsos eléctricos comprensibles por el cerebro, quien se encarga de transformarlos en imágenes.

Pensar en un sustituto del ojo cada vez se vuelve más difícil, al ver el grado de dificultad y precisión con el que trabaja.

Al contar con un panorama más amplio sobre qué es el ojo, qué es lo que en realidad el ojo “mira”, su funcionamiento y también la forma en la cual transmite la información al cerebro, el cual interpreta los pulsos eléctricos a imágenes, podremos concluir en la posibilidad de tener un sistema electrónico como sustituto del ojo.

Por lo tanto, con toda la información que tendremos, se discute un posible sustituto para el ojo humano y como sería su funcionamiento, a su vez veremos algunos adelantos que investigadores han tenido en este tema, y pensando a futuro, la implementación de un sistema capaz de no solo dar vista a un invidente, sino mejorar la forma en la que las personas videntes ven, con el fin de mejorar aún más el sistema visual del ser humano.

OBJETIVOS

General:

- Diseñar una prótesis ocular electrónica, capaz de enviar datos al cerebro.

Específicos:

1. Analizar el fenómeno de la luz, y las leyes que la rigen.
2. Analizar el funcionamiento del ojo humano y el nervio óptico.
3. Conocer el funcionamiento de las cámaras convencionales y digitales, y las propiedades de las imágenes.
4. Lograr hacer una analogía entre el ojo humano y la cámara digital.
5. Diseñar un circuito capaz de interactuar con el nervio óptico y transformar las señales digitales en pulsos eléctricos comprensibles por el cerebro.

INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años, los humanos nos hacemos cada vez mas dependientes de sistemas mecánicos y electrónicos para poder vivir, un ejemplo de esto son los sistemas transporte, tanto terrestres, marítimos y aéreos, que ya son parte del día a día del ser humano, a su vez, sistemas puramente electrónicos como computadores personales, servidores, enlaces de datos, Internet, etc.

Los sistemas electrónicos o la electrónica se ha ido metiendo cada día mas en nuestras vidas ayudándonos en tareas complejas o tal vez imposibles para un ser humano por si solo, también está teniendo un gran auge en diferentes ramas de la ciencia, llegando ya hasta la ciencias medicas, en sistemas tan complejos como fusionar la electrónica con seres vivos, con esto dando lugar a la biónica.

Etimológicamente, la palabra biónica viene del griego “*Bio*” que es vida y “*nica*” “técnica” o “electrónica”. Es una rama de la cibernética que estudia la biología, con el fin de obtener conocimientos útiles para idear proyectos y realizar aparatos y sistemas electrónicos.

Se podría decir entonces, que la biónica trata de simular el comportamiento de seres vivos, haciéndolos mejores en casi todas las ramas por medio de instrumentos mecánicos.

Gracias a la biónica, la medicina se ha visto favorecida en el reemplazo de miembros vitales para el cuerpo humano, que por alguna razón se degeneraron genéticamente o se dañaron, debido a una enfermedad, de hecho,

ya es posible encontrar implantes cocleares o retinianos que mejoran la audición o la visión según el dispositivo del que estemos hablando. No obstante las aplicaciones son inmensas y no solo limitadas a ampliar nuestras capacidades sensoriales (vista, oído, tacto, olfato y gusto) sino que también se pueden potenciar nuestro cerebro y sistema muscular o regular las funciones de determinados órganos con el corazón como un marcapasos.

1. LA LUZ

La luz que llega a nuestros ojos y es la cual nuestros ojos son capaces de percibir, son un pequeño conjunto de radiaciones electromagnéticas de longitudes de onda comprendidas entre los 380nm y los 770nm.

1.1. El espectro electromagnético

La luz forma parte del espectro electromagnético que comprende tipos de ondas tan dispares como los rayos cósmicos, los rayos gamma, los ultravioletas, los infrarrojos y las ondas de radio o televisión entre otros. Cada uno de estos tipos de onda comprende un intervalo definido por una magnitud característica que puede ser la longitud de onda (λ) o la frecuencia (f). Recordemos que la relación entre ambas es:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

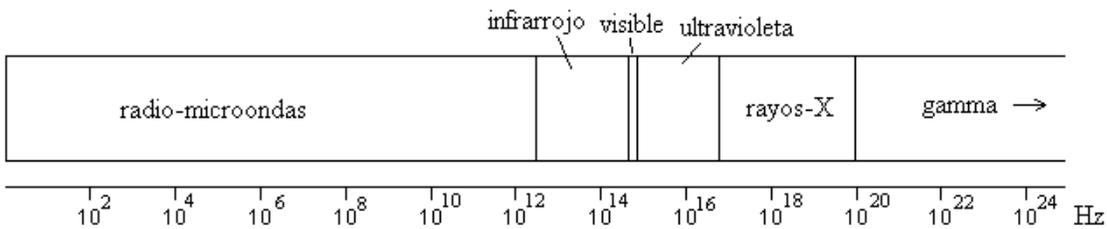
en donde c es la velocidad de la luz en el vacío ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s).

Las ondas electromagnéticas cubren una amplia gama de frecuencias o de longitudes de ondas y pueden clasificarse, según su principal fuente de producción. La clasificación no tiene límites precisos.

En la figura, se muestra las distintas regiones del espectro en escala logarítmica. En esta escala las ondas de radio y microondas ocupan un amplio

espacio. En esta escala podemos ver todas las regiones del espectro, sin embargo, el tamaño relativo de las distintas regiones está muy distorsionado.

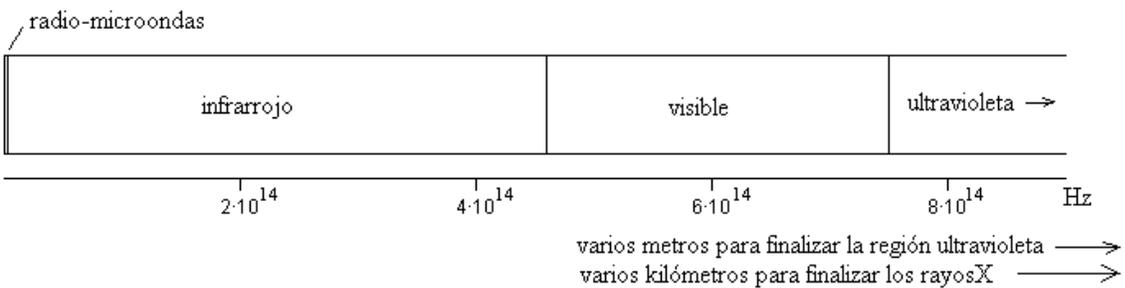
Figura 1 Representación gráfica del espectro electromagnético en escala logarítmica



En la siguiente figura, se representa las distintas regiones del espectro en escala lineal. En esta nueva podemos apreciar que la región de radio-microondas es muy pequeña, comparada con las siguientes bandas del espectro electromagnético.

En esta gráfica, el final de la región ultravioleta se encuentra varios metros a la derecha del final de la página, y a su vez, el final de los rayos X estaría varios kilómetros a la derecha de la página.

Figura 2 Representación gráfica del espectro electromagnético en escala lineal.



Por lo tanto, no se puede dibujar la representación lineal de todo el espectro electromagnético, por que sería de un tamaño gigantesco. Pero se puede dibujar la representación lineal de una fracción del espectro electromagnético, para darnos cuenta de las dimensiones relativas reales de sus distintas regiones.

Se describirán brevemente cada una de las bandas que conforman el espectro electromagnético, y mas adelante nos enfocaremos en la banda de espectro visible para su estudio en este capítulo.

1.1.1. Las ondas de radiofrecuencia

Sus frecuencias van de 0 a 109 Hz, se usan en los sistemas de radio y televisión y se generan mediante circuitos oscilantes.

Las ondas de radiofrecuencia y las microondas son especialmente útiles, porque en esta pequeña región del espectro las señales producidas pueden penetrar las nubes, la niebla y las paredes. Estas son las frecuencias que se usan para las comunicaciones vía satélite y entre teléfonos móviles. Organizaciones internacionales y los gobiernos elaboran normas para decidir que intervalos de frecuencias se usan para distintas actividades: entretenimiento, servicios públicos, defensa, etc.

En la figura, se representa la región de radiofrecuencia en dos escalas: logarítmica y lineal. La región denominada AM comprende el intervalo de 530 kHz a 1600 kHz, y la región denominada FM de 88 MHz a 108 MHz. La región FM permite a las emisoras proporcionar una

excelente calidad de sonido debido a la naturaleza de la modulación en frecuencia.

1.1.2. Las microondas

Se usan en el radar y otros sistemas de comunicación, así como en el análisis de detalles muy finos de la estructura atómica y molecular. Se generan mediante dispositivos electrónicos.

1.1.3. La radiación infrarroja

Se subdivide en tres regiones, infrarrojo lejano, medio y cercano. Los cuerpos calientes producen radiación infrarroja y tienen muchas aplicaciones en la industria, medicina, astronomía, etc.

1.1.4. La luz visible

Es una región muy estrecha pero la más importante, ya que nuestra retina es sensible a las radiaciones de estas frecuencias. A su vez, se subdivide en seis intervalos que definen los colores básicos (rojo, naranja, amarillo, verde, azul y violeta).

Esta banda se discutirá a detalle más adelante.

1.1.5. Radiación ultravioleta

Los átomos y moléculas sometidos a descargas eléctricas producen este tipo de radiación. No debemos de olvidar que la radiación ultravioleta es la componente principal de la radiación solar.

La energía de los fotones de la radiación ultravioleta es del orden de la energía de activación de muchas reacciones químicas, lo que explica muchos de sus efectos.

1.1.6. Rayos X

Si se aceleran electrones y luego se hacen chocar con una placa metálica, la radiación de frenado produce rayos X. Los rayos X se han utilizado en medicina desde el mismo momento en que los descubrió Röntgen, debido a que los huesos absorben más radiación que los tejidos blandos. Debido a la gran energía de los fotones de los rayos X son muy peligrosos para los organismos vivos.

1.1.7. Rayos gamma

Se producen en los procesos nucleares, por ejemplo, cuando se desintegran las sustancias radioactivas. Es también un componente de la radiación cósmica y tienen especial interés en astrofísica. La enorme energía de los fotones gamma los hace especialmente útiles para destruir células cancerosas. Pero son también peligrosos para los tejidos sanos por lo que la manipulación de rayos gamma requiere de un buen blindaje de protección.

1.2. El espectro visible

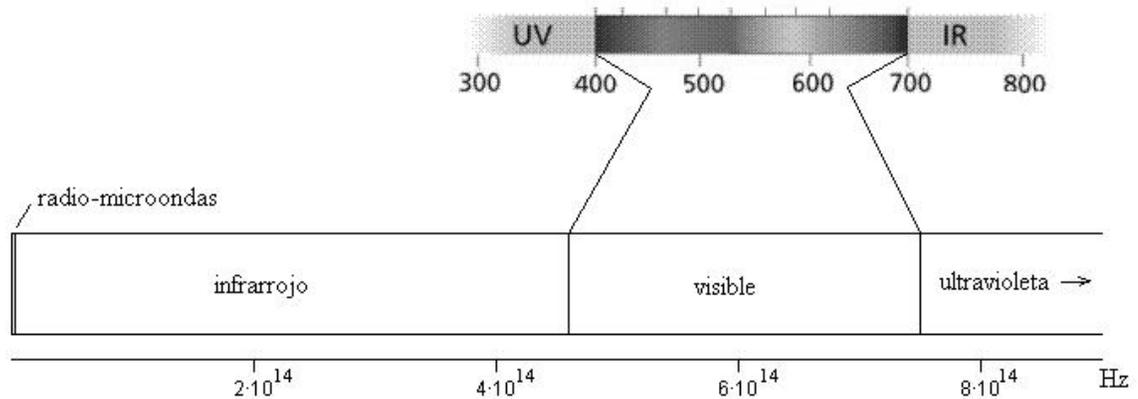
El espectro visible para el ojo humano es aquel que va desde los 380nm de longitud de onda para el color violeta hasta los 780nm para el color rojo. Fuera de estos límites, el ojo no percibe ninguna clase de radiación.

A la radiación electromagnética en este rango de longitudes de onda se le llama luz visible o simplemente luz. No hay límites exactos en el espectro visible; un típico ojo humano responderá a longitudes de onda desde 400nm a 700nm.

Un ojo adaptado a la luz generalmente tiene como máxima sensibilidad un valor de 555 nm, en la región verde del espectro visible. El espectro sin embargo no contiene todos los colores que los ojos humanos y el cerebro puedan distinguir. Café, rosado y magenta están ausentes, por ejemplo, porque se necesita la mezcla de múltiples longitudes de onda, preferiblemente rojos oscuros.

La longitud de onda visible al ojo también se pasa a través de una ventana óptica, la región de el espectro electromagnético que pasa muy atenuada a través de la atmósfera terrestre (a pesar de que la luz azul es más dispersa que la luz roja, que es la razón del color del cielo). La respuesta del ojo humano está definido por una prueba subjetiva, pero las ventanas atmosféricas están definidas por medidas físicas. La ventana visible se la llama así porque ésta superpone la respuesta humana visible al espectro; la ventana infrarroja está ligada a la ventana de respuesta humana y la longitud de onda media infrarroja, la longitud de onda infrarroja lejana están muy lejos de la región de respuesta humana.

Figura 3 Espectro visible.



Los ojos de muchas especies perciben longitudes de onda diferentes de las del espectro visible del ojo humano. Por ejemplo, muchos insectos, tales como las abejas pueden ver la luz ultravioleta que es útil para encontrar el néctar en las flores.

Los colores del arco iris en el espectro visible incluye todos esos colores que pueden ser producidos por la luz visible de una simple longitud de onda, los colores del espectro puro o monocromáticos.

A pesar que el espectro es continuo y por lo tanto, no hay cantidades vacías entre uno y otro color, los rangos siguientes podrían ser usados como una aproximación.

Tabla I Bandas de color en el espectro visible.

Violeta	380–450 nm
azul	450–495 nm
verde	495–570 nm
amarillo	570–590 nm
anaranjado	590–620 nm
Rojo	620–750 nm

1.3. Propiedades de la luz

- Se propaga en línea recta.
- Se refleja cuando llega a una superficie reflectante.
- Cambia de dirección cuando pasa de un medio a otro (se refracta).

1.3.1. La luz se propaga en línea recta

La luz se propaga en línea recta. La línea recta que representa la dirección y el sentido de la propagación de la luz se denomina rayo de luz (el rayo es una representación, una línea sin grosor, no debe confundirse con un haz, que sí tiene grosor).

Un hecho que demuestra la propagación rectilínea de la luz es la formación de sombras. Una sombra es una silueta oscura con la forma del objeto.

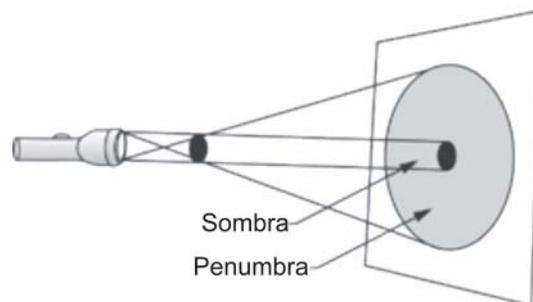
1.3.1.1. Sombras, penumbras y eclipses

Si un foco, grande o pequeño, de luz se encuentra muy lejos de un objeto produce sombras nítidas.

Si un foco grande se encuentra cercano al objeto, se formará sombra donde no lleguen los rayos procedentes de los extremos del foco y penumbra donde no lleguen los rayos procedentes de un extremo pero sí del otro.

Este fenómeno de sombra y penumbra es el que tiene lugar en los eclipses.

Figura 4 Propagación de la luz en línea recta, sombra y penumbra



1.3.2. La luz se refleja

La reflexión de la luz se representa por medio de dos rayos: el que llega a una superficie, rayo incidente, y el que sale "rebotado" después de reflejarse, rayo reflejado.

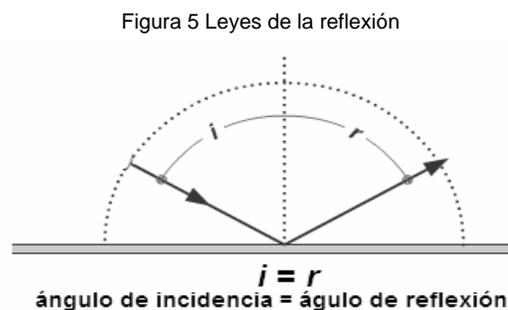
Si se traza una recta perpendicular a la superficie (que se denomina normal), el rayo incidente forma un ángulo con dicha recta, que se llama ángulo de incidencia.

1.3.2.1. Reflexión

La reflexión de la luz es el cambio de dirección que experimenta un rayo luminoso al chocar contra la superficie de los cuerpos. La luz reflejada sigue propagándose por el mismo medio que la incidente.

La reflexión de la luz cumple dos leyes:

- El rayo incidente, el reflejado y la normal están en un mismo plano perpendicular a la superficie.
- El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.



Podemos ver los objetos que nos rodean porque la luz que se refleja en ellos llega hasta nuestros ojos, existen dos tipos de reflexión de la luz: reflexión especular y reflexión difusa.

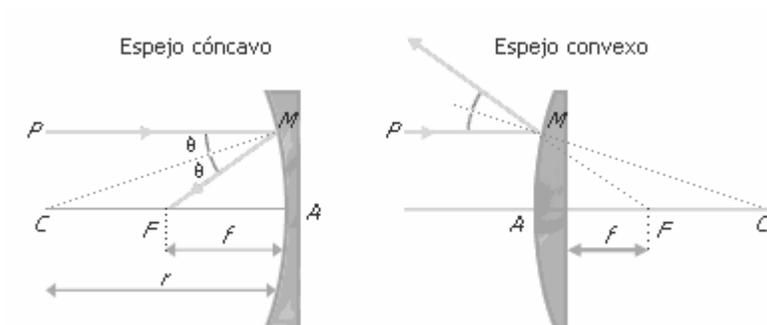
- Reflexión especular: la superficie donde se refleja la luz es perfectamente lisa (espejos, agua en calma) y todos los rayos reflejados salen en la misma dirección.

- Reflexión difusa: la superficie presenta rugosidades. Los rayos salen reflejados en todas las direcciones. Podemos percibir los objetos y sus formas gracias a la reflexión difusa de la luz en su superficie.

1.3.2.2. Imágenes en espejos curvos

Los rayos de luz pueden ser reflejados de distintas formas, dependiendo de la superficie con la que choquen, hay dos tipos especiales de espejos curvos muy comunes en la óptica, pueden ser cóncavos (superficie curva con la parte central más hundida) o convexos (superficie curva con la parte central saliente).

Figura 6 Reflexión en espejos cóncavos y convexos



1.3.3. La luz se refracta

La refracción de la luz es el cambio de dirección que experimentan los rayos luminosos al pasar de un medio a otro en el

que se propagan con distinta velocidad. Por ejemplo, al pasar del aire al agua, la luz se desvía, es decir, se refracta.

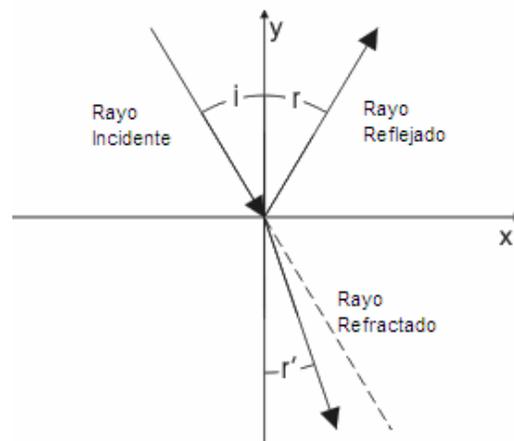
Las leyes fundamentales de la refracción son:

- El rayo refractado, el incidente y la normal se encuentran en un mismo plano.
- El rayo refractado se acerca a la normal cuando pasa de un medio en el que se propaga a mayor velocidad a otro en el que se propaga a menor velocidad. Por el contrario, se aleja de la normal al pasar a un medio en el que se propaga a mayor velocidad.

La relación entre la velocidad de la luz en el vacío y en un medio en el que pueda propagarse se denomina índice de refracción (η) de ese medio:

$$\eta = \frac{c}{v}$$

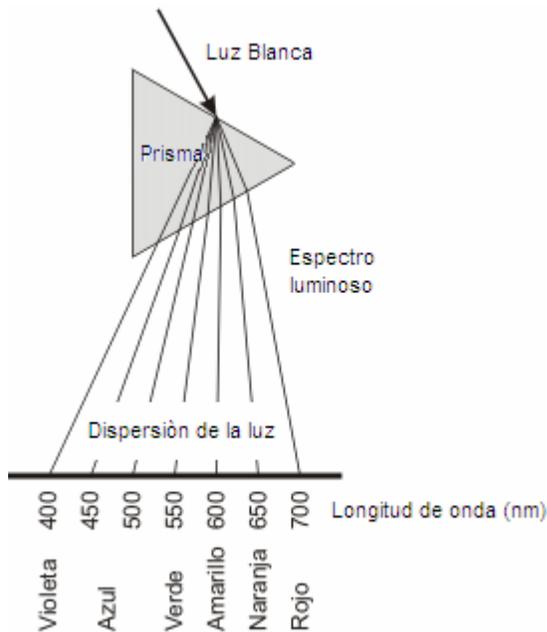
Figura 7 Rayo refractado al pasar por un material



1.3.3.1. La dispersión de la luz, una manifestación de la refracción

La luz blanca es una mezcla de colores: si un haz de luz blanca atraviesa un medio dispersor, como, por ejemplo, un prisma, los colores se separan debido a que tienen diferentes índices de refracción.

Figura 8 Dispersión de la luz por un Prisma



1.3.3.2. Las lentes

Se emplean para muy diversos fines: gafas, lupas, prismáticos, objetivos de cámaras, telescopios, etc. Existen dos tipos:

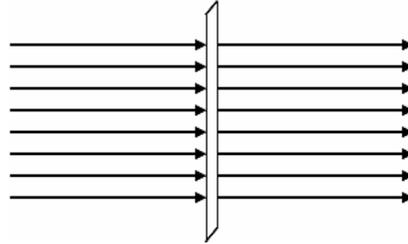
- Lentes convergentes: son más gruesas por el centro que por los extremos. Los rayos refractados por ellas convergen en un punto llamado foco.
- Lentes divergentes: son más gruesas por los extremos que por el centro. Los rayos refractados no convergen en un punto, sino que se separan.

1.4. La luz y la materia

La materia se comporta de distintas formas cuando la luz choca contra ella, en cualquiera de los siguientes casos:

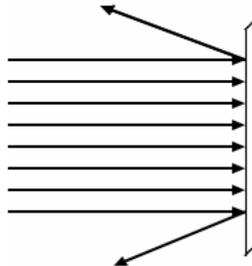
- Transparentes: permiten que la luz se propague en su interior en una misma dirección, de modo que vuelve a salir. Así, se ven imágenes nítidas. Ejemplos: vidrio, aire, agua, alcohol, etc.

Figura 9 Rayos de luz a través de un objeto transparente.



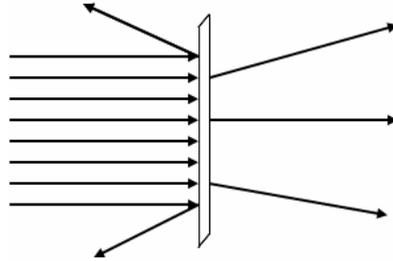
- Opacos: estos materiales absorben la luz o la reflejan, pero no permiten que los atraviese. Por tanto, no se ven imágenes a su través. Ejemplos: madera, metales, cartón, cerámica, etc.

Figura 10 Rayos de luz a través de un objeto opaco.



- Translúcidos: absorben o reflejan parcialmente la luz y permiten que se propague parte de ella, pero la difunden en distintas direcciones. Por esta razón, no se ven imágenes nítidas a su través. Ejemplos: folio, tela fina, papel cebolla, etc.

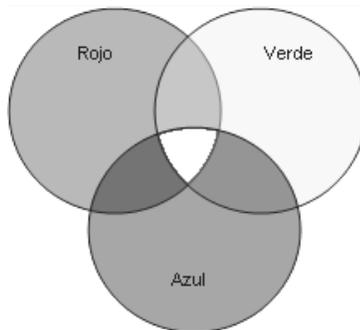
Figura 11 Rayos de luz a través de un objeto translúcido.



La luz blanca se compone de los diferentes colores del arco iris: violeta, azul, verde, amarillo, naranja y rojo.

En realidad, existen tres colores: rojo, verde y azul, llamados colores primarios, que al mezclarse en diferentes proporciones dan lugar a todos los demás. Si se mezclan en las mismas cantidades producen luz blanca.

Figura 12 Composición de los colores a partir de los 3 primarios.



El color de los objetos se debe a las siguientes causas:

- Transmisión: algunos materiales transparentes absorben toda la gama de colores menos uno, que es el que permiten que se transmita y da

color al material transparente. Por ejemplo, un vidrio es rojo porque absorbe todos los colores menos el rojo.

- Reflexión: la mayor parte de los materiales pueden absorber ciertos colores y reflejar otros. El color o los colores que reflejan son los que percibimos como el color del cuerpo.

Un cuerpo es blanco cuando refleja todos los colores y negro cuando absorbe todos los colores (Los cuerpos negros se perciben gracias a que reflejan difusamente parte de la luz; de lo contrario no serían visibles).

2. EL OJO HUMANO

El ojo humano es un órgano que tiene una notable capacidad de adaptarse para ver objetos distantes o distinguir pequeños objetos, como también nos permite apreciar un amplio rango de colores.

El funcionamiento del ojo se debe a que los rayos de luz que recibimos constantemente inciden, a través del cristalino, en la retina que se encuentra en la parte posterior del ojo; allí los rayos de luz se convierten en impulsos que viajan a través del nervio óptico hacia la corteza del cerebro relacionada con la visión, creándose las imágenes que vemos.

En un ojo normal los rayos de luz enfocan sobre la retina, para lograr ver objetos distantes o cercanos.

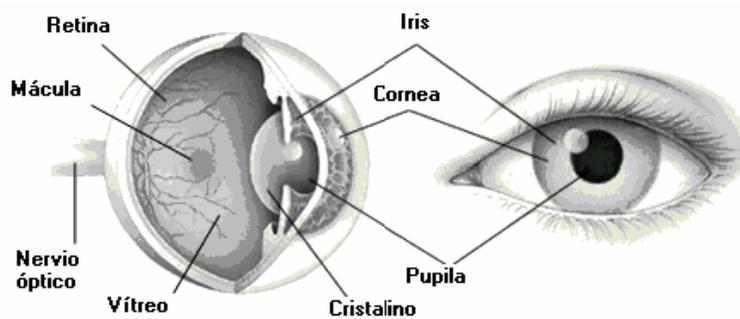
Dado que cada uno de nuestros ojos tiene una visión levemente diferente de un objeto, nuestro cerebro debe encargarse de fusionar las imágenes para crear un efecto tridimensional, dándonos la posibilidad de percibir la profundidad y la distancia.

Para poder entender la definición anterior, estudiaremos las partes del ojo y su función, para poder encontrar un análogo electrónico de ellos y poder sustituir el órgano de la visión con un dispositivo electrónico.

2.1. Anatomía del ojo humano

El ojo humano es un órgano compuesto por varias partes, cada una de las cuales tiene su función específica.

Figura 13 Anatomía del ojo humano.



2.1.1. Globo ocular

El globo ocular es una estructura esférica de aproximadamente 2,5 cm de diámetro con un marcado abombamiento sobre su superficie delantera.

La parte exterior, o la cubierta, se compone de tres capas de tejido:

- La capa más externa o esclerótica tiene una función protectora, cubre unos cinco sextos de la superficie ocular y se prolonga en la parte anterior con la córnea transparente.
- La capa media o úvea tiene a su vez tres partes diferenciadas:

- La coroides, reviste las tres quintas partes posteriores del globo ocular-
- El cuerpo ciliar, formado por los procesos ciliares,
- El iris, que se extiende por la parte frontal del ojo.
- La capa más interna es la retina, sensible a la luz.

Ahora discutiremos el funcionamiento del ojo a través del estudio de las partes más importantes del mismo.

2.2. Funcionamiento del ojo

El ojo es capaz de tener un buen funcionamiento en un entorno iluminado como en uno oscuro, detecta un amplio rango de colores a la luz del día y, cuando el sol se pone puede brindarnos un panorama en blanco y negro. Los rayos de luz que inciden a través del cristalino alcanzan la retina que se encuentra en la parte posterior del ojo.

En la retina, los rayos se convierten en impulsos que viajan a través del nervio óptico hacia la corteza del cerebro relacionada con la visión y que crea las imágenes que vemos. Debido a que cada uno de nuestros ojos tiene una visión levemente diferente de un objeto, el cerebro fusiona las imágenes para crear un efecto tridimensional (Estereoscópico) y de esta manera nos permite percibir la profundidad y la distancia.

2.2.1. Córnea

En el frente del globo ocular se encuentra una membrana transparente, como el vidrio de un reloj, denominada córnea. La córnea junto con el cristalino, enfoca la luz que ingresa al ojo.

2.2.2. Iris

Detrás de la córnea se encuentra el iris: la porción circular del tejido pigmentado que le da su color al ojo. La pupila, una abertura que se encuentra en el centro del iris, se agranda y se reduce para controlar la cantidad de luz que ingresa al ojo.

2.2.3. Esclerótica

La esclerótica (o blanco del ojo) es la capa externa fibrosa y de color blanco que recubre al globo ocular. Su función es la de proteger las estructuras sensitivas del ojo.

2.2.4. Coroides

La coroides es la capa de vasos sanguíneos y se encuentra detrás de la retina a la que le proporciona oxígeno y otros nutrientes.

2.2.5. Retina

La retina es la túnica delgada de múltiples capas que se encuentra en la parte posterior del ojo y funciona como una pantalla sobre la cual la córnea y el cristalino proyectan imágenes. (Cuando una persona tiene un desprendimiento de retina, la superficie interna sensible a la luz se ha separado de las capas externas) La mácula, en el centro de la retina, es la región que distingue el detalle en el centro del campo visual. Dos tipos de receptores visuales hay en la retina, los conos y los bastones, traducen las imágenes en impulsos nerviosos que se envían al cerebro. Los conos requieren una luz relativamente brillante para su funcionamiento, pero pueden detectar muchos tonos y matices de color. Por el contrario, los bastones requieren muy poca luz, lo que los hace muy adecuados para la visión nocturna; sin embargo, no pueden discernir los colores.

2.2.6. Conjuntiva

Esta membrana flexible y transparente forma un sello sobre el blanco del ojo y continúa hasta la superficie del párpado. Dentro de la conjuntiva se encuentran diminutas glándulas que producen lágrimas y mucosidad que ayudan a lubricar el ojo.

2.2.7. Cristalino

El cristalino se encuentra precisamente detrás del iris, y su función es lograr el enfoque preciso, proceso que se conoce como acomodación. La forma del cristalino es alterada por pequeños músculos ciliares que lo hacen más curvo para poder enfocar los objetos cercanos y lo achatan para poder enfocar los objetos distantes. La formación de cataratas hace que el cristalino se vuelva opaco, determinando así una visión borrosa y la disminución de la percepción del color.

2.2.8. Cuerpo vítreo

El cuerpo vítreo es la masa transparente que ocupa el espacio entre el cristalino y la retina. Está compuesto por una sustancia gelatinosa que mantiene la forma del globo del ojo.

Necesitamos luz para poder ver lo que nos rodea y para ver colores. La luz choca contra los objetos que miramos, y esta refleja en distintas cantidades de luz, y de esta forma es como podemos observar diferentes colores.

Los rayos de luz entran al frente de nuestros ojos a través de la córnea y el cristalino, es muy importante que tanto la córnea y la pupila se encuentren limpias para que permita el paso de la luz directo del frente del ojo a la retina.

La córnea y el cristalino mueve de tal forma la luz para que puede ser enfocada en la retina en la parte trasera del ojo, esto nos da una clara y precisa imagen. La córnea enfoca la luz directo a la retina, y el cristalino da un arreglo mas fino en el enfoque de la luz. A su vez, las lágrimas proveen una capa de protección a la parte frontal del ojo y a su vez previenen el directo choque de la luz.

El iris, cambia de tamaño la pupila para permitir la entrada de diferentes cantidades de luz entren al ojo.

La pupila es la parte oscura en el centro de la parte de color del ojo, la pupila se hace pequeña en condiciones brillantes para permitir la entrada de poca luz, y se hace grande en condiciones oscuras para permitir la entrada de más luz al ojo.

La retina se encuentra en la parte posterior del ojo, esta es una capa sensible a la luz que consiste en células llamadas conos y bastones, estas células colectan las señales de luz que inciden directamente en ellos y las envían como señales eléctricas al nervio óptico en la parte trasera del ojo.

Los bastones están concentrados en el borde de la retina. Estos nos ayudan a ver las cosas que no están directamente frente de nosotros, dándonos una idea de que es lo que nos rodea, a su vez nos permiten ver las cosas en luz tenue, y para ver movimientos.

Los conos están concentrados en el centro de la retina, donde la luz es enfocada por la córnea y el cristalino, esta área es llamada macula, los conos son los que nos dan una visión detallada, la cual usamos cuando leemos,

miramos televisión, o cuando miramos caras de otras personas, también son las responsables en gran parte de nuestra visión a color.

El nervio óptico está hecho de miles de fibras de nervio, estas fibras pasan la señal eléctrica a lo largo del ojo a la parte del cerebro encargada de el procesamiento de las imágenes que miramos.

2.3. Fotorreceptores, conos y bastones

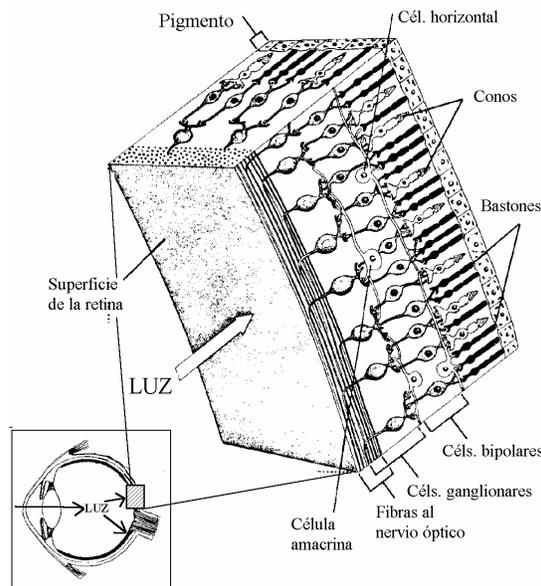
La luz, una vez que atraviesa la córnea, el iris y el cristalino, es absorbida por los pigmentos visuales de las células receptoras de la retina, codificando las imágenes ópticas en impulsos nerviosos, cuya actividad eléctrica varía con la cantidad de luz recibida.

La retina es más que un conjunto de células fotorreceptoras, pues contiene además, otras células nerviosas cuyas interacciones sinápticas suponen el inicio del complejo procesamiento de las señales visuales. La retina de los vertebrados contiene 5 tipos principales de células: fotorreceptoras, bipolares, horizontales, amacrinas y ganglionares, que se estructuran en las 10 capas (células, membranas y núcleos).

Existen dos tipos principales de células fotorreceptoras (bastones y conos). Ambos tipos celulares establecen una conexión sináptica directa con interneuronas, células bipolares, que conectan a las células fotorreceptoras con las células ganglionares. Los axones de estas últimas llevan los potenciales de acción hacia el cerebro a través del nervio óptico. Modificando el flujo de información en las sinapsis entre fotorreceptores, células bipolares y células

ganglionares existen dos tipos celulares de interneuronas: las células horizontales y las amacrinas. Las primeras están entre los fotorreceptores y las células bipolares y establecen sinapsis de inhibición lateral para conseguir una visión más perfecta; mientras que las amacrinas se disponen mediando entre las células bipolares y las ganglionares.

Figura 14 Estructura celular de la retina.



La capa de células fotorreceptoras se encuentra próxima a la coroides, de la que está separada por un epitelio rico en melanina. La melanina del epitelio pigmentario absorbe el exceso de luz y evita la retro reflexión, lo que tiene una gran importancia para obtener una mayor agudeza visual. Este es el motivo que los animales albinos (sin pigmento de melanina) estén siempre deslumbrados y por ello apenas consigan un 20% de agudeza visual de los animales que no los son. También a través del epitelio pigmentado la retina obtiene los nutrientes desde los vasos coroides.

Un gran número de animales (la mayoría de los animales domésticos y silvestres pero no en el cerdo y hombre) esta capa pigmentaria contiene un pigmento reflectante en la zona denominada tapetum (*tapetum lucidum*), de tal manera que la luz que llega al tapetum se refleja y regresa de nuevo a los fotorreceptores lo que permite que la retina puede hacer un uso óptimo de la luz que llega a los ojos en condiciones de menos intensidad luminosa, aunque a expensas de la agudeza visual; el tapetum es el responsable del brillo en los ojos de los animales cuando se les dirige una luz en la oscuridad.

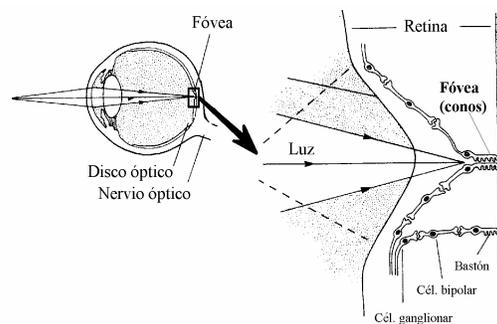
A lo largo de la mayor parte de la retina, los rayos de luz atraviesan las 10 capas retinianas y las células ganglionares, bipolares y ocasionalmente amacrinas y horizontales antes de alcanzar los fotorreceptores. Aunque, membranas, núcleos y células son relativamente transparentes pueden, sin embargo, provocar alguna distorsión de los rayos de luz.

La fovea (de 0,4 milímetros de diámetro) situada en el centro de la retina es la zona de la retina donde se logra la mayor agudeza visual. Está especialmente diseñada para minimizar la distorsión de la luz, ya que en ella, las células ganglionares y bipolares están colocadas hacia un lado permitiendo el acceso directo de los rayos luminosos a los conos, pues los bastones se encuentran fuera de la fovea.

En la exploración ocular, utilizando un oftalmoscopio se puede observar un punto donde la retina se halla interrumpida por la salida de los axones de la capa celular ganglionar en su camino hacia el cerebro. Este punto, localizado en posición anterior a la fovea, es el disco óptico; origen del nervio óptico (I par craneal), nervio muy rico en axones (existen más axones en ambos nervios ópticos que en todas las raíces dorsales de la médula espinal). En el disco óptico no existen fotorreceptores, por lo que también se denomina área ciega.

También visible con el oftalmoscopio es la salida de los vasos sanguíneos retinales. Éstos son una trama de arterias y venas que penetran a la retina a nivel del disco óptico y proveen gran parte de la nutrición de la retina; los vasos de la coroides proporcionan la nutrición restante.

Figura 15 Disco óptico y fovea.



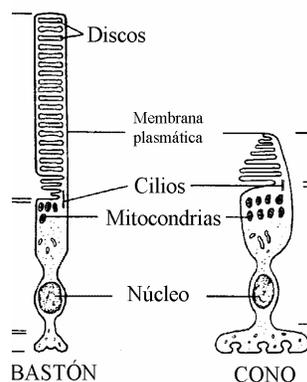
Los fotorreceptores, de los cuales existen 120 millones de conos y 7 millones de bastones en la especie humana, tienen características morfológicas similares, pero son diferentes funcionalmente. En ambos tipos celulares se distinguen tres regiones comunes claramente diferenciadas: el segmento externo, el segmento interno y el terminal sináptico.

El segmento externo está especializado en la fotorrecepción y presenta una elaborada ordenación de unos 1.000 discos membranosos apilados ricos en pigmentos visuales (rodopsina en el bastón y yodopsina en el cono); los discos en los bastones están separados de la membrana plasmática al contrario de lo que ocurre en los conos. El segmento interno conecta con el externo mediante un cilio modificado que contiene nueve pares de microtúbulos, pero que carece de los dos pares de microtúbulos centrales; el segmento interno contiene el núcleo, las mitocondrias y demás estructuras citoplasmáticas. El

terminal sináptico, por último, entra en contacto con una o más células bipolares.

Funcionalmente, los bastones son más sensibles a la luz que los conos, se encuentran por toda la retina y son más importantes para la percepción visual cuando la luz es de baja intensidad, como ocurre en el crepúsculo y al amanecer. Son receptores de baja frecuencia (380 a 600 nm de longitud de onda). Los conos no son tan sensibles a la luz como los bastones, y son funcionalmente más importantes cuando la intensidad luminosa es alta, como sucede durante el día (receptores de alta frecuencia, 450 a 780 nm). Los conos son también los únicos responsables de la visión del color en los animales que poseen ese poder de discriminación.

Figura 16 Composición celular de los conos y bastones.



2.3.1. Fotoquímica de la visión

En los fotorreceptores se produce una transducción foto-químico-eléctrica que da lugar a que en la terminal sináptica se libere mayor o menor cantidad de NT en relación con la magnitud del potencial receptor.

La estimulación de los fotorreceptores se inicia por la absorción de la luz por el pigmento visual y el efecto fotoquímico correspondiente; ello lleva consigo cambios de permeabilidad iónica y génesis de potencial receptor que, desde el segmento externo, pasa al segmento interno y se transmite a la región sináptica donde, mediada por un transmisor, la señal alcanza otras neuronas retinianas (bipolares y horizontales).

Los fotorreceptores son distintos al resto de receptores sensoriales pues no detectan impulsos nerviosos típicos; sin embargo, en los bastones y conos, al ser alcanzados por la luz, se establecen unas ciertas condiciones físico-químicas que van a desencadenar el impulso de otras células nerviosas. Donde si se detectan los impulsos nerviosos es en el nervio óptico, por fibras nerviosas de las células ganglionares.

La fotoquímica de la visión es el mecanismo más complicado y preciso de los sentidos. Este complejo mecanismo lo estudiamos en tres apartados: ciclo del pigmento visual, generación del potencial receptor y adaptación a la luz y oscuridad.

2.3.1.1. Ciclo de pigmentación visual

Los pigmentos visuales son proteínas complejas; pero se ha visto que la parte del pigmento que absorbe la luz (porción cromatófora) es una sustancia muy parecida a la vitamina A, se trata del aldehído de la vitamina A (retinal) en sus formas cis y trans. Los pigmentos visuales de la membrana fotosensible de bastones y conos son diferentes. En los bastones se encuentra la rodopsina y en los conos hay yodopsina. Para

explicar los mecanismos fotoquímicos de la visión nos referiremos a los bastones por estar mejor estudiados.

La rodopsina, proteína de la membrana de los discos de los bastones, tiene dos componentes, una proteína llamada opsina y un pigmento llamado retinal (11-cis-retinal). En presencia de luz, la rodopsina, en una billonésima de segundo, comienza a descomponerse, a través de varias formas intermedias hacia el 11-trans-retinal, más estable, con escisión de la parte proteica, lo que provoca pérdida de color de la molécula (blanqueamiento) y esto significa que no genera potencial receptor.

La rodopsina se sintetiza en ausencia relativa de luz y su síntesis implica la actuación de una enzima con aporte de energía metabólica para la reducción de todo el trans-retinal a cis-retinal. Después, este cis-retinal se recombina con la opsina para formar de nuevo rodopsina.

2.3.1.2. Generación del potencial receptor

En los conos y bastones no existe potencial de acción, sólo un potencial receptor que se transmite al resto de las células nerviosas, siendo las células ganglionares las encargadas de transmitir los potenciales de acción, a través del nervio óptico.

El mecanismo de producción del potencial receptor es el siguiente: la bomba Na^+/K^+ está restringida a la membrana que rodea el núcleo y el segmento interno impulsa continuamente iones Na^+ desde el interior al

exterior y, por tanto, crea un potencial negativo dentro de la célula. Sin embargo, en oscuridad, la membrana del segmento externo se hace permeable y deja pasar fácilmente el Na^+ y así neutraliza en gran parte la negatividad del interior de toda la célula, dando un potencial receptor a los bastones de -25 a -30 mV. Este potencial receptor es proporcional al logaritmo de la intensidad de la luz, y así el ojo puede distinguir entre intensidades luminosas muy variadas. Cuando la rodopsina se expone a la luz, se descompone y esto hace disminuir la conductancia de los iones Na^+ hacia el interior del bastón, aunque sigan impulsándose iones desde el segmento interno hacia el exterior. De esta forma, resulta que hay salida de iones positivos sin la correspondiente entrada de los mismos por el segmento externo; lo que produce aumento de la negatividad intracelular (estado de hiperpolarización), alcanzándose valores de -90 mV.

Puesto que la membrana plasmática del bastón está separada de la de los discos que contienen el pigmento fotosensible, el efecto de la disminución de la permeabilidad para el Na^+ debe depender de un mediador químico como es el GMPc. Al parecer, el GMPc se encarga de mantener los canales de Na^+ en configuración abierta; la luz activa una proteína, llamada transducina, en la membrana del fotorreceptor que promueve la acción de una fosfodiesterasa que hidroliza el GMPc, lo que hace que los canales de Na^+ se cierren y la membrana se hiperpolarice.

2.3.1.3. Adaptación a la luz y a la oscuridad

Los ojos son capaces de adaptarse a niveles altos y bajos de intensidad luminosa. La adaptación a la luz ocurre cuando el animal es

expuesto a la luz brillante, como al salir de un establo en un día soleado. Esto provoca que las sustancias fotoquímicas de los bastones y conos se reduzcan a opsinas y retinal, lo que hace disminuir la sensibilidad del ojo a la luz. Al mismo tiempo, el diámetro de la pupila se reduce por constricción refleja parasimpática del músculo constrictor pupilar, disminuyendo la cantidad de luz que entra al ojo.

La adaptación a la oscuridad ocurre cuando el animal se desplaza de un ambiente bien iluminado a un lugar oscuro, o más gradualmente al oscurecer en la tarde. En la oscuridad, todo el retinal está incorporado a la rodopsina y gran parte de la vitamina A del epitelio pigmentario es absorbida por los bastones cuyo contenido en rodopsina será máximo y su sensibilidad a la luz también. De esta forma, la reconstitución de las sustancias fotoquímicas permite a los ojos detectar niveles muy bajos de intensidad luminosa.

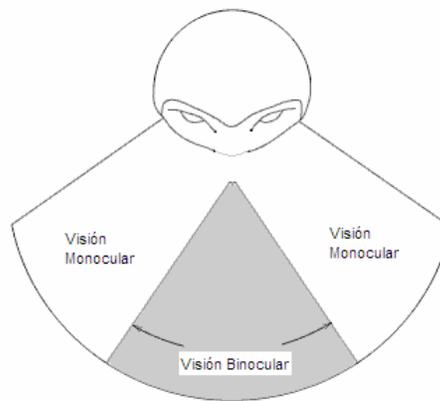
2.4. Visión binocular

Toda el área espacial a partir de la cual puede formarse la imagen visual completa del ojo, se conoce como "campo de visión".

Este área de imagen superpuesta forma una zona de visión binocular simultánea que está íntimamente relacionada con la percepción de la profundidad y el sentido de la posición (cuando se mira un objeto con los dos ojos se obtiene una mayor impresión de profundidad que cuando se mira con uno sólo). El mayor tamaño de las áreas de visión binocular en especies como por ej., el gato y el perro es lo que les da capacidad para saltar con seguridad sobre una presa que se mueve con rapidez. Por otro lado, la situación más

abierta de los ojos de los herbívoros (vaca, caballo), los capacita para gozar de un amplio campo de visión lateral monocular (visión panorámica), incluso para extender la visión alrededor de ellos con ligeros movimientos de la cabeza; sin embargo, en contraposición, presentan un área ciega anterior sin visión lateral ni binocular (así por ej., el torero para evitar ser visto por el toro se aproxima a él para colocarse en el área ciega del animal). El conejo tiene incluso un pequeño campo de visión binocular por detrás de él cuando eleva su cabeza.

Figura 17 Visión binocular y monocular.



2.5. El nervio óptico

El nervio óptico está compuesto por axones de las células fotorreceptoras situadas en la retina, capaces de convertir la luz en impulsos nerviosos. Transmite la información visual desde la retina hasta el cerebro para realizar funciones de reconocimiento de imágenes o patrones.

Es un nervio sensorial que emerge del globo ocular; es el nervio que nos permite la visión.

El nervio óptico, se origina en la capa de células ganglionares de la retina. Los axones de estas células ganglionares, al reunirse y dirigirse hacia atrás, forman el nervio óptico.

Este nervio mide aproximadamente 4 cm de longitud, y se dirige hacia arriba, atrás y adentro.

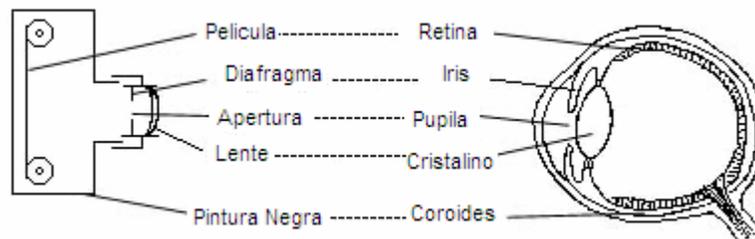
Se describen en él cuatro segmentos:

- Primer segmento: intraocular. Los axones de las células ganglionares de la retina convergen en la papila óptica, desde allí el nervio perfora las capas superficiales del ojo (esclerótica y coroides) en un sitio llamado zona cribosa.
- Segundo segmento: intra orbitario. El nervio queda comprendido en un cono formado por los músculos rectos del ojo y se sumerge en la grasa retroocular. En el vértice de la órbita por el anillo fibroso que presta inserción a los músculos rectos (anillo de Zinn). En este segmento el nervio se relaciona por arriba con la arteria oftálmica y por fuera con el ganglio oftálmico.
- Tercer segmento: intracanalicular. El nervio atraviesa el agujero óptico acompañado por la arteria oftálmica. En este sitio, es frecuente la lesión del nervio por fractura que comprometan la base del cráneo y vértice de la órbita.
- Cuarto segmento: intracraneal. Mide 1 cm y esta comprendido entre el agujero óptico y el quiasma. En este segmento el nervio está situado sobre la tienda de la hipófisis y sobre el canal óptico del esfenoides.

3. ANALOGÍA CÁMARA OJO

Por su similitud en su funcionamiento la cámara es muchas veces comparada con el ojo, básicamente el ojo es el sistema de adquisición de imágenes del cuerpo humano, a su vez, la cámara digital o analógica, es un sistema de adquisición de imágenes para sistemas analógicos o electrónicos, para transmisión o almacenamiento de imágenes o videos, básicamente estos sistemas pueden compararse por la similitud de su funcionamiento de la siguiente forma:

Figura 18 Partes de la cámara y partes del ojo.



Es evidente que la construcción de la cámara fue pensada en el funcionamiento del ojo, ya que sus similitudes en partes y funcionamiento son notables.

Es posible pensar en que la cámara puede llegar a funcionar como un sustituto del ojo, pero para esto es necesario poseer un acople biónico entre la

cámara y el cerebro lo que hace complicado pensar que un dispositivo electrónico puede llegar a conectarse al cerebro.

3.1. Cámara fotográfica

A pesar de los modernos avances técnicos de las cámaras réflex de hoy en día, el proceso básico por el cual un negativo se impresiona formando una copia de la realidad sigue siendo el mismo que en las primeras cámaras.

En esencia, la cámara es un cajón oscuro con un agujero por el que entra la luz reflejada por el objeto que fotografiamos para plasmarse sobre un negativo produciendo un proceso químico casi instantáneo. Los haluros de plata del negativo reaccionan a la luz formando diminutos puntitos. Las zonas que reciben más luz aparecen más oscuras pues se ha formado un mayor número de cristales, mientras que las más blancas son las menos impresionadas.

Este proceso da como resultado una imagen negativa, es decir, con los colores invertidos. Debe ser positivada mediante el revelado para obtener la copia final con los colores originales.

Las cámaras tienen tres mecanismos de control básicos para regular este proceso y obtener una foto nítida y correctamente expuesta.

3.1.1. El anillo de enfoque

Está situado en el objetivo. Al girarlo modificamos la distancia entre la lente y el plano de la película. De esta forma logramos poner a foco el objeto fotografiado, que de otra manera podría salir desenfocado al formarse su imagen en un plano anterior o posterior al de la película.

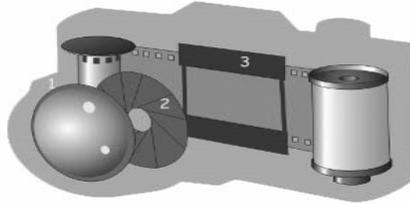
3.1.2. El diafragma

Es el agujero por el cual entra la luz. Es un anillo formado por unas laminillas metálicas que permiten variar el diámetro de la abertura y regular de esta manera la cantidad de luz que entra. Se maneja girando otro anillo situado en el objetivo.

3.1.3. El obturador

Cuando pulsamos el botón de disparo estamos accionando el obturador. Suelen ser dos cortinillas situadas delante del negativo que se abren y se cierran durante unas fracciones de segundo. El obturador controla el tiempo durante el cual se impresionará la película.

Figura 19 Anillo de enfoque, diafragma y obturador.



Como podemos darnos cuenta, el hombre se basó en el funcionamiento del ojo para la creación de un sistema mecánico, capaz de imitar el funcionamiento de nuestro ojo y plasmar en papel imágenes tal y como el ojo las plasma en nuestro cerebro.

Con el fin de poder convertir una imagen del papel o almacenadas en algún tipo de dispositivo en pulsos eléctricos capaces de ser comprensibles por el nervio óptico, es necesario que también tengamos un sistema de procesamiento de imágenes para convertir una imagen captada por un sistema mecánico en datos electrónicos o pulsos eléctricos como lo hacen los conos y los bastones en el ojo humano.

3.2. Procesamiento digital de imágenes

El conjunto de técnicas que permite modificar una imagen digital con el objetivo de mejorarla o extraer de ella información se conoce como procesamiento digital de imágenes.

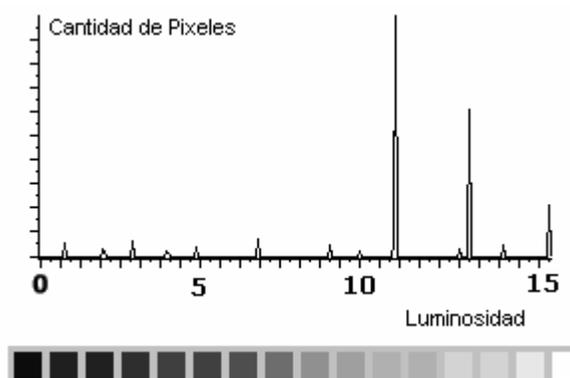
En esta parte pondremos más énfasis en el análisis de imágenes a Blanco y Negro ya que su tratamiento es mucho más sencillo, y más práctico para los fines de explicación.

3.2.1. Histograma

Un histograma es un gráfico estadístico que permite representar la distribución de intensidad de los píxeles de una imagen, es decir, el número de píxeles que corresponde a cada intensidad luminosa. Por convención, el histograma representa el nivel de intensidad con coordenadas X que van desde lo más oscuro (a la izquierda) a lo más claro (a la derecha).

De esta manera, el histograma de una imagen con 256 niveles de gris será representado por un gráfico que tenga 256 valores en el eje X y el número de píxeles de la imagen en el eje Y.

Figura 20 Ejemplo de un histograma.



El histograma muestra que en la imagen hay más tonos de gris claro que de gris oscuro. El tono de gris más utilizado es el 11 desde la izquierda.

Para las imágenes a color se necesitan varios histogramas. Por ejemplo, para una imagen codificada en RGB hay:

- Un histograma que representa la distribución de luminancia,
- Tres histogramas que representan la distribución de los valores de los componentes rojo, azul y verde, respectivamente.

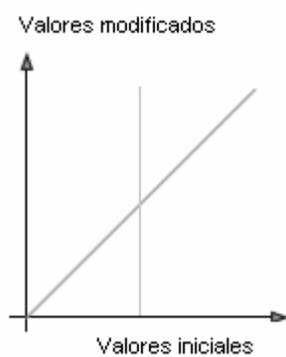
3.2.2. Modificación de un histograma

Un histograma es una herramienta sumamente útil para estudiar la distribución de los componentes de una imagen, pero también permite la corrección del contraste y el rango de colores en las imágenes sobreexpuestas o subexpuestas. Además, su modificación no deteriora la información contenida en la imagen, sino que la vuelve más o menos visible.

La modificación de un histograma se representa generalmente en una curva (llamada curva tonal) que indica la modificación total de los componentes de la imagen con los valores iniciales en el eje X y los valores después de la modificación en el eje Y. La curva tonal corresponde a una función de transferencia definida por una tabla de traslación llamada tabla de consulta, que se escribe LUT por sus siglas en inglés. De esta manera, la diagonal indica la curva sobre la cual los valores iniciales equivalen a los valores finales, es decir, cuando no se ha producido una modificación. Los valores a la izquierda del valor promedio en el eje X representan los píxeles

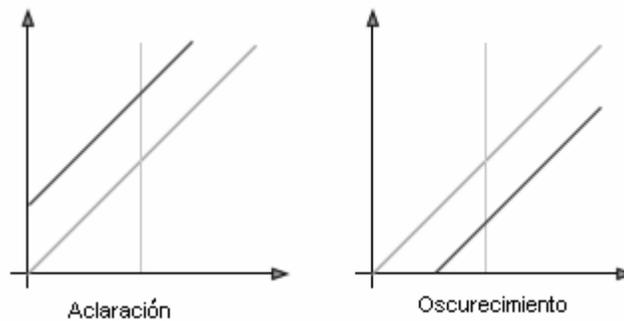
de "luz", mientras que los que se encuentran a la derecha representan los píxeles oscuros.

Figura 21 Gráfica de un histograma modificado.



De esta manera, si la curva de modificación del histograma se encuentra debajo de la diagonal, los píxeles tendrán valores menores, y por lo tanto, se habrán aclarado. Por el contrario, si la curva está por encima de la diagonal, los píxeles se habrán oscurecido.

Figura 22 Gráfica de un histograma aclarado y oscurecido.



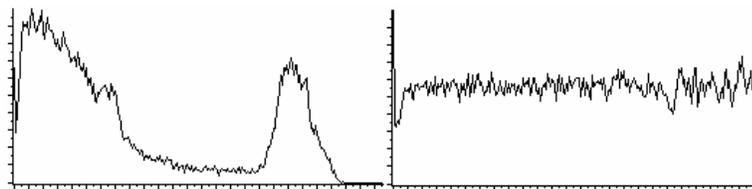
3.2.3. Ecuación del histograma

El objetivo de la ecuación del histograma es armonizar la distribución del nivel de luminosidad de la imagen, de tal manera que cada uno de los niveles del histograma tienda hacia contener el mismo número de píxeles. Esta operación se propone aumentar los matices de la imagen.

Figura 23 Imagen de muestra de ecuación de histograma.



Figura 24 Gráfica de ecuación.



La curva tonal que corresponde a la ecuación del histograma depende totalmente de la imagen. No obstante, la mayoría de las aplicaciones generalmente ofrece una herramienta que permite llevar a cabo esta operación de manera automática.

3.2.4. Expansión del histograma

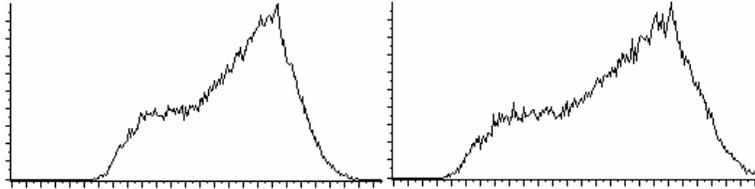
La expansión del histograma (también llamada "linearización del histograma" o "expansión del rango dinámico") consiste en distribuir las frecuencias de la apariencia de los píxeles en todo el ancho del histograma. Por lo tanto, es una operación que consiste en modificar el histograma de manera de distribuir las intensidades en la escala de valores disponibles de la mejor forma posible. Esto equivale a expandir el histograma de manera que el valor de la intensidad más baja sea cero y el de la intensidad más alta sea el valor máximo.

De este modo, si los valores del histograma están muy juntos unos a otros, la expansión permitirá proporcionar una mejor distribución para aclarar aún más los píxeles claros y acercar los píxeles oscuros al negro.

Figura 25 Expansión del histograma.



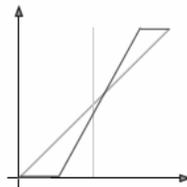
Figura 26 Gráfica de la expansión del histograma.



Por lo tanto, es posible aumentar el contraste de una imagen. Por ejemplo, una imagen que es demasiado oscura se volverá más "visible". Sin embargo, este procedimiento no siempre da buenos resultados.

La curva tonal correspondiente a la expansión del histograma es la siguiente

Figura 27 Curva tonal.



3.2.5. Umbral

La operación conocida como "umbral simple" consiste en utilizar cero para todos los píxeles cuyo nivel de gris se encuentra por debajo de un cierto valor (llamado el umbral) y el valor máximo para todos los píxeles con un valor mayor. De esta manera, el resultado de la aplicación de este umbral es una imagen binaria que contiene píxeles negros y blancos; es por eso

que a veces se utiliza el término binarización. El umbral hace posible destacar formas u objetos en una imagen. No obstante, la dificultad consiste en la selección del umbral a utilizar.

A continuación hay una imagen con 256 niveles de gris y el resultado de una operación de aplicación de umbrales con valores de 125 y 200 respectivamente

Figura 28 Imagen de ejemplo de cambio de umbral.

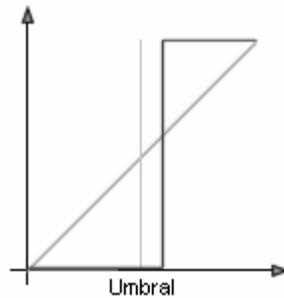


Figura 29 Cambio de umbral a 125 y a 200 respectivamente.



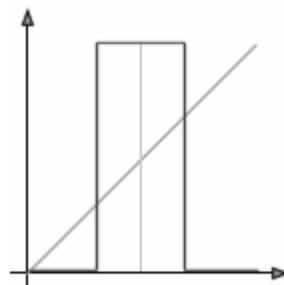
La curva tonal de la operación de aplicación del umbral es la siguiente

Figura 30 Curva tonal a un respectivo umbral.



A diferencia del "umbral simple", es posible definir dos niveles de umbral, que son el límite inferior y el superior respectivamente, y se utiliza el máximo valor para los píxeles que tienen un valor entre estos límites y cero para todos los otros valores

Figura 31 Curva tonal a 2 niveles de umbral.

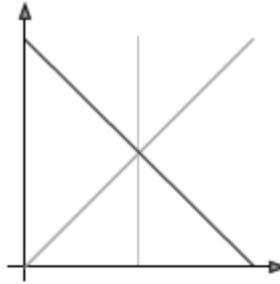


3.2.6. Inversión (negativo)

La operación de inversión consiste en invertir los valores de los píxeles con respecto al promedio de los valores posibles, como su nombre lo indica. El resultado obtenido se llama negativo.

La curva tonal de la operación de inversión de video es la siguiente

Figura 32 Curva de inversión.



Podemos decir entonces que con un análisis de histograma de las imágenes que detectemos a través de un dispositivo analógico o digital, al pasar las imágenes a blancos y negros es posible hacer un trato de la imagen y ajustarla de tal forma que pueda ser lo mas sencilla posible para una posible transmisión o conexión con el nervio óptico.

El sistema para un posible sustituto del ojo cada vez se hace más complejo de construir, ya que no solo es necesario un sistema capaz de poder convertir la luz en señales eléctricas, sino que también es necesario un sistema de procesamiento de imagen con el cual traducir las imágenes a cuadros sencillos.

El problema se incrementa si pensamos en que es necesario hacer el acople biónico entre las piezas de electrónica y los componentes vivos de nuestro cuerpo, aunque no imposible es necesario que el sistema sea lo mas preciso posible para tener un resultado favorable.

El ojo solo es el interprete de luz a pulsos eléctricos, en realidad es el cerebro el que decodifica los pulsos eléctricos y los interpreta en imágenes, este proceso le toma al cerebro milésimas de segundo en llevar acabo, ya que la cámara como tal no funciona exactamente como el ojo funciona, es por eso que es necesario un sistema que procese la imagen de tal forma que sea mas entendible al cerebro, de alguna manera lo que se propone es no solo llevar las imágenes al cerebro como son captadas, sino aprovechar las virtudes del procesamiento de imágenes por computadora para poder llevarlas al cerebro mejoradas y de esta forma talvez no solo dar vista sino también mejorar la forma en que el ojo funciona.

Con un sistema de procesamiento de imagen podríamos mejorar sustancialmente lo que miramos con nuestros ojos, es posible pensar en sistemas que mejoren nuestra vista en todos los sentidos, como dar una mejor nitidez a las cosas que vemos, poder hacer enfoques, acercamientos, visión nocturna, etc. Un sistema de procesamiento externo podría ayudar a nuestros a dar la vista que nunca antes un hombre podría tener.

Es posible aplicar mas técnicas de procesamiento de imágenes, en este capitulo solo se habla de la técnica del histograma en blanco y negro, ya que se presenta más fácil para fines de este estudio, en el siguiente capítulo se ofrece un sistema sencillo capaz de sustituir al órgano humano.

4. DISEÑO DE PRÓTESIS OCULAR

Durante lo estudiado en los capítulos anteriores, podemos concluir en lo siguiente:

- El ojo es un transductor, ya que transforma parte de la energía radiada del espectro electromagnético llamada luz visible, a pulsos eléctricos que se transfieren al cerebro.
- Son solo 2 tipos de células fotorreceptivas las que hacen el trabajo de conversión de energía, los conos y bastones.
- Los conos son mayoritariamente encargados de la visión a color, mientras que los bastones son mayormente encargados de la visión nocturna o a blanco y negro, en ambientes de luz escasa.
- El concepto del funcionamiento de la cámara fotográfica, es muy similar al funcionamiento del ojo humano, simulando partes del ojo para el funcionamiento de la cámara fotográfica.
- A través de un procesamiento digital de imágenes, es posible convertir una imagen o una toma del entorno en una imagen nueva mas nítida o bien llevarla hasta un punto tan bajo que pueda ser lo mas sencilla posible, con el tratamiento de histograma en umbral.

Es necesario también definir para qué tratamiento será pensada la construcción de la prótesis ocular, ya que según lo visto anteriormente se puede pensar en tener para 2 posibles tipos de personas, personas con problemas en

el órgano receptor, o un proyecto de mejoramiento del ojo en personas videntes.

Para poder seguir con este tema por último tenemos que discutir un poco sobre la biónica y sus adelantos al día de hoy.

4.1. La biónica

Se podría decir, la biónica es aquella rama de la cibernética que trata de simular el comportamiento de los seres vivos haciéndolos mejores en casi todas las ramas por medio de instrumentos mecánicos.

Asimismo, existe la ingeniería biónica que abarca varias disciplinas con el objetivo de hacer trabajar juntos sistemas biológicos y sistemas mecánicos, por ejemplo para crear prótesis activadas por los nervios, robots controlados por una señal biológica o también crear modelos artificiales de cosas que solo existen en la naturaleza, por ejemplo la visión artificial y la inteligencia artificial también llamada cibernética.

Los seres vivos son máquinas complejas, dotadas de una gran variedad de instrumentos de medición, de análisis, de recepción de estímulos y de reacción y respuesta, esto es gracias a los cinco sentidos que hemos desarrollado. Crear máquinas que se comporten como cerebros humanos, capacitadas para observar un comportamiento inteligente y aprender de él, es parte del campo de la investigación de la robótica y la inteligencia artificial. Dentro de ese comportamiento inteligente se encuentran tanto las actividades relacionadas con el raciocinio, es decir, estrategia y

planeamiento, como con la percepción y reconocimiento de imágenes, colores y sonidos.

Con la definición anterior podemos ver que es necesario incluir a la biónica dentro de este ejercicio, ya que esta prácticamente genera la interacción entre seres vivos y mecanismos eléctricos, electrónicos o mecánicos.

Con el paso de los años la biónica a dado pasos muy grandes en adelantos de reemplazo de miembros del cuerpo humano, prótesis de manos electrónicas estimuladas por pulsos eléctricos en los músculos del brazo, también prótesis de pies y piernas, de igual forma estimuladas por pulsos eléctricos en los músculos del muslo.

Gracias a que el sistema nervioso transmite la información alrededor del cuerpo a través de estos pulsos eléctricos, es posible pensar en un decodificador de estos pulsos que sea capaz de entender las instrucciones del cerebro, y poder transmitir esas instrucciones fuera del cuerpo a través de sistemas biónicos, estos a su vez que puedan emular el funcionamiento de partes del cuerpo humano.

Es gracias a estos pulsos que podemos interactuar con el cuerpo humano, ya que la electrónica se basa tanto en señales analógicas, como en pulsos digitales, a su vez, con los adelantos en la electrónica y partes eléctricas cada vez mas pequeñas y mas funcionales, es mas fácil pensar que es posible llegar a sustituir partes corporales por sistemas mecánico-electrónicas, que puedan tanto recibir señales del cuerpo (unidireccional), como también transmitir señales de vuelta al cerebro sobre eventos que la parte mecánica pueda percibir (bidireccional).

Figura 33 Comunicación unidireccional.

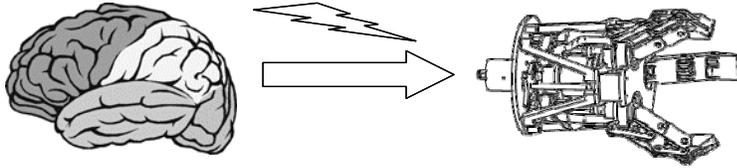
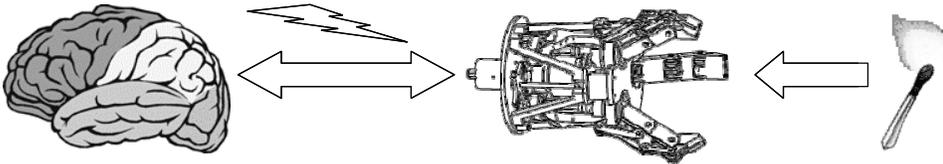
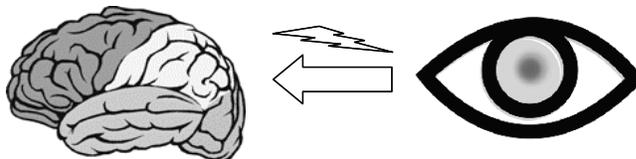


Figura 34 Comunicación bidireccional.



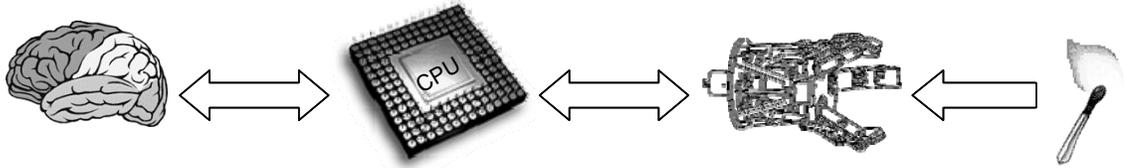
Siendo el ojo un transductor, que introduce señales al cerebro y no el cerebro al ojo, nos damos cuenta que es un sistema unidireccional, que manda señales al cerebro.

Figura 35 Comunicación unidireccional, ojo-cerebro.



Es necesario que exista un sistema capaz de traducir o interpretar las señales del cerebro para poder dar instrucciones a los dispositivos externos, ya sea un procesador digital, o computadora por lo que el diagrama para una conexión de un equipo o prótesis al cuerpo humano sería de la siguiente forma.

Figura 36 Comunicación bidireccional, con procesamiento de señales.



El CPU o unidad central de proceso (por sus siglas en inglés), debe de ser el encargado de traducir las señales entre la prótesis y los pulsos eléctricos del sistema nervioso, según el lugar en donde se estimula el pulso eléctrico significa un movimiento y una cierta tensión o fuerza para la prótesis, en caso fuera una mano como en la ilustración.

En el caso del ojo, el CPU debe de hacer un tratamiento previo de la imagen para mejorar su calidad o atenuarla según sea el caso.

4.2. Diseño de un ojo biónico

Tendremos las siguientes premisas como guía para el diseño:

- El nervio óptico se encuentra en buenas condiciones.
- La visión será en blancos y negros.

4.2.1. Cómo será la visión

Como vimos en capítulos anteriores, el ojo posee 120 millones de conos y 7 millones de bastones, en un área muy pequeña, por lo que cada célula se hace infinitamente pequeña lo que hace mas difícil poder excitarla con un ente externo al cuerpo.

Ya que los conos son los encargados de la visión a color y los bastones de la visión en blancos y negros, y al ser los bastones muchísimo menos y poder proporcionar una visión a blanco y negro, descartaremos los conos por su complejidad y trabajaremos con los bastones, que básicamente dan un nivel de grises según la luz que incide en ellos.

4.2.2. Fotorreceptor

Los adelantos hoy en día en la electrónica nos han podido acercar cada vez más a componentes electrónicos muy pequeños, incluso a fotorreceptores muy diminutos aproximados a los conos y los bastones.

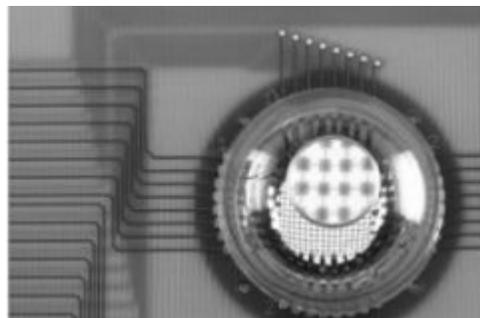
Existe ya una cámara digital que copia la forma y funcionamiento del ojo humano, y en el futuro, además de para técnicas de bioingeniería, podría mejorar el rendimiento de las cámara de fotos digitales y que éstas se comportaran más como el ojo humano, La clave de este desarrollo ha sido poder colocar los componentes electrónicos en una superficie curva y flexible sin que se rompa todo. Ahora lo han conseguido. Para ello se valieron de una membrana elástica formada por semiconductores sobre la que se incluyeron la red de sensores de luz. La

técnica usada ya se puede aplicar a otros productos, por lo que la limitación que presentaban las superficies curvas ya ha sido vencida.

Esto fue diseñado por Yonggang Huang, profesor de Ingeniería Mecánica de la Escuela McCormick de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad del Noroeste, ha colaborado con John Rogers, profesor de Ingeniería y Ciencia de los Materiales en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, para crear un panel de detectores de silicio y un sistema electrónico que se pueden acomodar en una superficie curvada.

Al igual que el ojo humano, la superficie curvada puede actuar entonces como el plano focal de la cámara, y al utilizar un dispositivo como este, se puede emular el campo visual del ojo.

Figura 37 Cámara digital con fotorreceptores.



4.2.3. CPU

El CPU será el encargado del procesamiento digital de la imagen captada por los fotorreceptores, el procesamiento de la imagen será con la técnica del histograma.

Ya que se excitarán los bastones para una visión a blancos y negros, se hará un tratamiento de histograma de umbral a la imagen, de manera que los bastones sean excitados primero por 1 y 0, es decir, el histograma de umbral será lo mas sencillo posible para poder dar como de sombras y bultos.

A pesar que la visión será lo más limitada posible con el tratamiento de la imagen por histograma, será una gran ayuda para una persona no vidente, ya que nunca ha visto claridad ni luz.

La idea es que según se pueda ir adaptando la idea, el umbral del histograma vaya cada vez creciendo más hasta extender el histograma a un nivel de grises más aceptable y se pueda tener una visión cada vez más nítida.

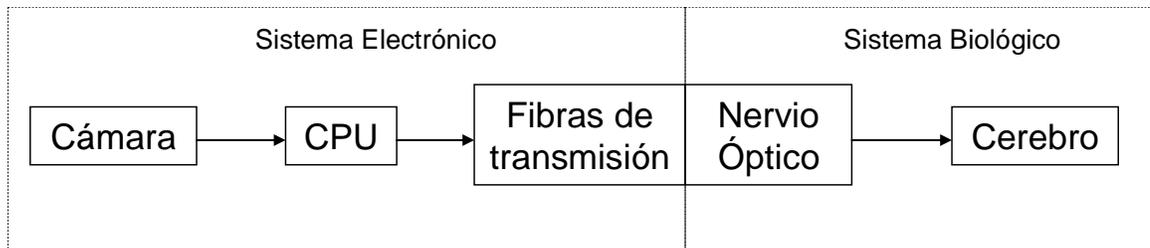
4.2.4. Enlace biónico

Esta debería de ser la parte mas fácil de construir, pequeñas fibras de material conductor, deben de excitar la retina, y los bastones, con pulsos eléctricos de aproximadamente -25 a -90 mv. los cuales viajarían por el nervio óptico al cerebro el cual los reconocería como blancos, generando imágenes en el cerebro.

A través de minúsculos electrodos que exciten la ultima capa de la córnea donde los bastones envían la información al nervio óptico, se puede trasladar la información de el CPU al cerebro.

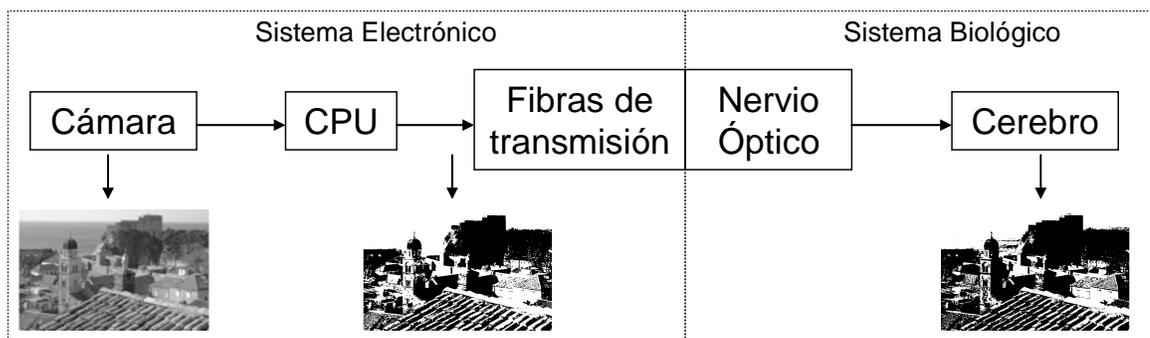
De esta manera un diagrama de bloques de la prótesis seria de la siguiente manera.

Figura 38 Diagrama de bloques.



Una idea de la forma en que la imagen será degradada para ser comprensible por el cerebro se da de la siguiente forma.

Figura 39 Diagrama de bloques más imagen.



De esta manera, se puede apreciar que la imagen será degradada por el CPU para hacer una mejor integración con el nervio óptico, y a su vez, debido a la complejidad del sistema óptico y contando con que el acople biónico no sea el óptimo, la imagen se degradará aun mas, pero aun así será perceptible por el cerebro.

Como para el cerebro la ausencia de luz se representa con el color negro, el mal acople con las fibras y los bastones dejaran una imagen más oscura que la real.

4.2.5. Tecnologías similares

La visión artificial describe un sistema de técnicas diseñadas para restaurar una cierta visión a personas con pérdida severa de la visión substituyendo un defecto o un acoplamiento que falta a lo largo del camino visual. Varios modelos se han propuesto, incluyendo las prótesis secundario-retinianas (diseñadas para sustituir fotorreceptores en la retina), las prótesis epi-retinianas (diseñadas para comunicarse directamente con el ganglio y las células bipolares), estímulo óptico del nervio, y las prótesis corticales (diseñadas para estimular la corteza visual directamente para los pacientes sin un nervio óptico viable).

En 1929, el estímulo eléctrico del lóbulo occipital de la corteza del ser humano dio lugar a la opinión de un punto pequeño de la luz, llamado un phosphene. Los estudios del estímulo eléctrico y de la producción de phosphenes condujeron a la investigación sobre las prótesis corticales que utilizan electrodos implantados en el cerebro.

En junio de 2002, el doctor William H. Dobelle presentaba la segunda generación de su sistema de visión artificial: ocho personas ciegas desde hacía varios años lograban ver mediante un sistema de estimulación eléctrica del córtex cerebral.

Una cámara de televisión miniaturizada, sobre una montura de gafas, enviaba imágenes a un microordenador alojado en el cinturón del paciente, que procesaba los datos y los remitía a un estimulador que, por medio de cables percutáneos, los enviaba a los electrodos aplicados en el córtex visual. Mediante la percepción de fosfenos, los pacientes detectaban y seguían el movimiento, visualizaban contornos, evitaban obstáculos, cuatro de ellos incluso distinguían colores sólo que su percepción era temporal y su campo de visión, de imagen túnel.

CONCLUSIONES

1. El ojo es básicamente un transductor, ya que transforma la energía radiada llamada luz, en pulsos eléctricos, en una escala logarítmica proporcional a la cantidad de luz que incide en la retina.
2. Debido al funcionamiento del ojo, si es posible pensar en un sistema mecánico-electrónico capaz de sustituir a ojo, y ser conectado al nervio óptico y tener la misma función en incluso mejorada del miembro.
3. Para la puesta en marcha de este proyecto, es necesaria la inversión de mucho tiempo en investigación sobre el sistema nervioso, e inclusive para su desarrollo es necesaria la ayuda de doctores especializados en las ramas de la neurología y oftalmología.
4. No es loco pensar que en un futuro no tan lejano, técnicas como esta sean utilizadas como armas de guerra, para crear a seres biónicos capaces de tener vista telescópica, e inclusive poder tener un análisis a tiempo real de las imágenes que se observan a través de la prótesis.
5. Adelantos en la ciencia como este, son los que hacen pensar que algún día el hombre podrá sustituir partes de su cuerpo con partes mecánicas controladas por el cerebro, siendo estas cada vez mas parecidas a los miembros reales del cuerpo humano, dando así un salto en la medicina regenerativa mediante procesos de cibernética y biónica.

RECOMENDACIONES

1. A lo largo de este trabajo se revisaron ciertos parámetros que es necesario tomar en cuenta en el diseño de una prótesis ocular, pero se discutió poco sobre el sistema nervioso central del cuerpo humano, que es necesario conocer también para saber de qué forma va el cuerpo humano a reaccionar ante un dispositivo como este. Debido a esto recomiendo que si se va a efectuar el diseño en pruebas verdaderas, es necesario involucrar de lleno a neurólogos y médicos relacionados con el área del sistema nervioso central, para ver el lado humano del acople y tener una integración, electrónica-medica, para evitar y descartar cualquier problema o situación que en este diseño pudo ser olvidado.
2. A su vez, si este diseño fuera implementado, se recomienda que se evalúen las distintas y nuevas tecnologías que hoy en día se tiene, por ejemplo, la nanotecnología, los adelantos en la nanotecnología van a dar lugar a una serie de mejoras en los diseños biónicos, ya que está estrechamente relacionada, este tipo de tecnología está dando lugar a mejores dispositivos electrónicos, más pequeños y de bajo consumo de energía, que podrían ser alimentados con pequeñas baterías.
3. El manejo de pacientes es muy delicado, por lo que para trabajar este diseño es necesario también involucrar a muchas entidades de gobierno y servicio público, por las reglas de países sobre estos temas y las regulaciones mundiales para manejo de pacientes y enfermedades.

BIBLIOGRAFÍA

1. WG de Dobbelle WH y de Mladejovsky: **Phosphenes producido por el estímulo eléctrico de la corteza occipital humana y de su uso al desarrollo de una prótesis para la persiana.** Estados Unidos: J. Physiol. 1974.
2. EM de Schmidt, Bak y otros. **Viabilidad de una prótesis visual para la persiana basada en el microstimulation intracortical de la corteza visual.** Estados Unidos: Cerebro, 1996.
3. Rousche PJ y RA. **Microstimulation intracortical crónico (ICMS) de la corteza sensorial del gato usando el arsenal del electrodo de Utah Intracortical.** Estados Unidos: Inglés 1999 del transporte Rehab de IEEE; 1999.
4. Dobbelle, WH. **Visión artificial para la persiana conectando una cámara de televisión con la corteza visual.** Estados Unidos; diario 2000 de ASAIO, 2000.